PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 04-264207
(43)Date of publication of application : 21.09.1992

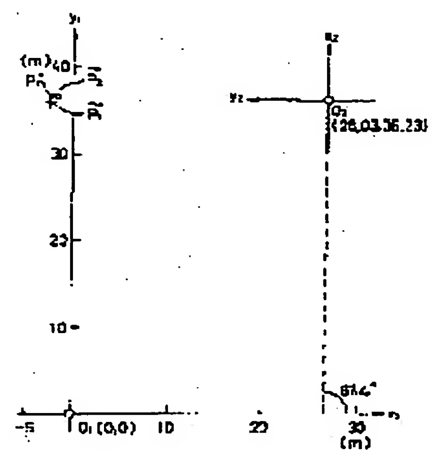
(51)Int.Cl. G01B 11/00
G01C 3/06

(21)Application number : 03-045404
(22)Date of filing : 19.02.1991

(71)Applicant : NIPPON TELEGR & TELEPH CORP <NTT>
(72)Inventor : NARUSE HIROSHI
TATSUTA MITSUHIRO
NOBIKI ATSUSHI
IDE ATSUSHI

(54) MEASUREMENT OF MULTI-VIEW POINT STEREOSCOPIC IMAGE

(57)Abstract:
PURPOSE: To achieve higher measuring accuracy by performing a statistic processing considering anisotropy of errors in a multi-view point stereoscopic image measurement method in which a statistic processing is applied to the measurement results from a plurality of view points to measure the position of an object.
CONSTITUTION: A first view point O1 and a second view point O2 with a known relationship with the first view point O1 are used to measure coordinates of an object to be measured with true coordinates being P1° from the first and second view points O1 and O2 respectively. Probability density function of errors in the measurement is synthesized to determine the maximum likelihood estimated position of the object.



LEGAL STATUS
[Date of request for examination]
[Date of sending the examiner's decision of rejection]
[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]
[Date of final disposal for application]
[Patent number]
[Date of registration]
[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

(6)

(19)日本国特許庁（ＪＰ）　(12) **公開特許公報**（Ａ）　(11)特許出願公開番号

特開平4－264207

(43)公開日　平成4年(1992)9月21日

(51)Int.Cl.[5]	識別記号	庁内整理番号	ＦＩ	技術表示箇所
Ｇ０１Ｂ　11/00	Ｈ	7625－2Ｆ		
Ｇ０１Ｃ　3/06	Ｖ	9008－2Ｆ		

審査請求　未請求　請求項の数1（全 13 頁）

(21)出願番号　特願平3－45404

(22)出願日　平成3年(1991)2月19日

(71)出願人　000004226
日本電信電話株式会社
東京都千代田区内幸町一丁目1番6号

(72)発明者　成瀬　央
東京都千代田区内幸町一丁目1番6号　日本電信電話株式会社内

(72)発明者　立田　光廣
東京都千代田区内幸町一丁目1番6号　日本電信電話株式会社内

(72)発明者　野引　敦
東京都千代田区内幸町一丁目1番6号　日本電信電話株式会社内

(74)代理人　弁理士　若林　忠

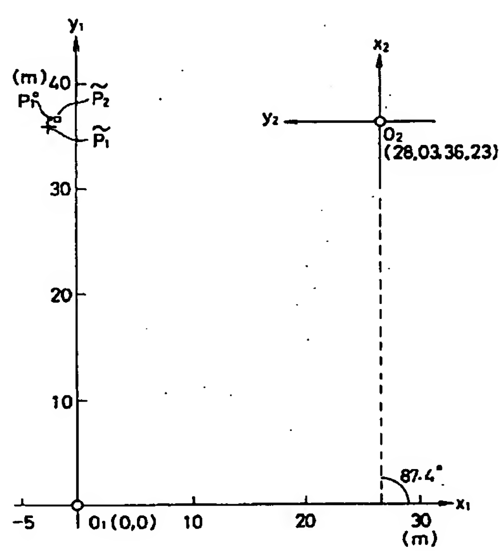
最終頁に続く

(54)【発明の名称】　多視点ステレオ画像計測方法

(57)【要約】

【目的】　複数の視点からの計測結果に統計処理を施して物体の位置を計測する多視点ステレオ画像計測方法において、誤差の異方性を考慮した統計処理を施すことにより、計測精度を向上させた方法を提供する。

【構成】　第1の視点O_1と第1の視点O_1との位置関係が既知である第2の視点O_2とを用い、真の座標が$P_1{}^0$である計測対象の物体の座標を第1、第2の視点O_1、O_2のそれぞれから計測し、前記各計測における誤差の確率密度関数を合成して、前記物体の最尤推定位置を求める。



(2) 特開平4－264207

【特許請求の範囲】

【請求項1】　n（ただしn≧2）個の視点からの計測結果に統計処理を施して物体の位置を計測する多視点ステレオ画像計測方法であって、第1の視点において前記物体を撮影し、撮影されたステレオ画像を演算処理して、前記第1の視点を基準点とする第1の視点座標系により前記物体の座標を計測する第1の工程と、前記第1の視点に既知量の並進操作および回転操作を施して得た第i（ただし2≦i≦n）の視点のそれぞれにおいて前記物体を撮影し、撮影されたステレオ画像を処理して、前記第1の視点を基準点とする第1の視点座標系により前記物体の座標を計測する第2の工程と、前記各視点座標系間の相対位置関係に基づいて、前記第1の工程および第2の工程で行なわれた各計測の誤差の確率密度関数を合成し、前記物体の最尤推定位置を求める第3の工程とを有する多視点ステレオ画像計測方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】本発明は、ステレオ画像処理によって物体の位置を計測する方法に関し、特に複数の視点からの計測結果に統計処理を施して物体の位置を計測する多視点ステレオ画像計測方法に関する。

【0002】

【従来の技術】工場における自動検査、測量などの分野において、3次元空間を視点に設けられた左右の2台のカメラによって2次元平面に投影し、2台のカメラ間の視差により物体の位置を計測するステレオ画像計測方法が用いられている。まず、このステレオ画像計測方法について図3により説明する。3次元空間を表す座標としてx，y，zを用い、この3次元空間を左右の2台のカメ＊ラによって投影した2次元の画像面2、3上の位置を表す座標としてu，vを用いる。x軸とu軸、z軸とv軸はそれぞれ平行であり、y軸はカメラの光軸1に平行であるとする。また、測量などの場合と同様に、xy平面は地平面と平行に水平であると仮定する。水準器などを用いれば、水平面を0．1mradの精度で容易に設定できるから、この仮定は妥当なものである。視点を3次元空間座標系（xyz座標系）の原点Oとし、左右のカメラの投影中心F，Fの中点を前記原点Oと一致させる。左右のカメラ間の距離を2aとすると、投影中心F，Fの3次元空間内の座標はそれぞれ(-a,0,0)，(a,0,0)となる。なお、現実のカメラの場合には、画像面はカメラの投影中心に関して計測対象の反対側にあり画像は倒立像となるが、図3では説明を容易にするため、画像面を計測対象と同じ側の、投影中心に関して対称の位置にし、画像が正立像となるようにしてある。このとき投影中心F，Fと画像面との距離をfとすると、左右のカメラの画像面2、3における画像原点O，Oの3次元空間座標はそれぞれ(-a,f,0)，(a,f,0)で表される。以下、左、右の画像をそれぞれ添字l，rで表す。

【0003】3次元空間内の点Pが、左右の画像面2、3上の点I（u，v），I（u，v）にそれぞれ投影されたとする。ステレオ画像計測方法では、画像面上で点I，Iを計測し、三角測量の原理によって点Pの3次元空間座標(x,y,z)を算出する。ここでは、2台のカメラの光軸1が水平面内にあり、かつx軸とu軸とが平行であるから、vとvとは同じ値となり、以下両者を区別せずvで表す。直線FIとFIが点Pで交わるという条件から点P(x,y,z)は、

$$x = a(u + u)/(u - u) \quad \cdots(1)$$

$$y = 2af/(u - u) \quad \cdots(2)$$

$$z = 2av/(u - u) \quad \cdots(3)$$

と求められる。

【0004】このようなステレオ画像計測を行うための装置の一例の構成を図4に示す。この装置はデジタル画像処理によるものであり、左右の2台のテレビカメラ4で撮像された画像は、それぞれ走査線ごとに走査されて時間的に連続した画像信号に変換される。この画像信号は、各テレビカメラ4ごとに設けられたデジタイザ5に入力し、デジタイザ5内のサンプラによって、碁盤の目のように2次元に配列された縦横それぞれ数百個の画素に標本化され、さらにデジタイザ5内のA／D変換器によって、各画素に入射した光量に対応した数百階調に量子化される。このように左右の画像はそれぞれデジタル画像に変換され、各デジタイザ5ごとに設けられた画像メモリ6のそれぞれに記憶される。そして計算機（CPU）7により、記憶されたデジタル画像に微分処理を施すなどして明るさの変化する場所としての物体の境界を検出する。このような処理を左右の画像について行うことにより、それぞれの画像面上の対応点I（u，v），I（u，v）が求められる。そののち上記式(1)～(3)によって点P(x,y,z)を求めればよい。

【0005】次に、ステレオ画像計測における誤差の性質について説明する。ステレオ画像計測を満足するような位置精度でカメラを設定することは可能であり、ステレオ画像計測における誤差は、主として画像面上での投影点の位置計測精度に起因する。ここでは、画像面上での投影点の位置計測精度と3次元空間内での位置決定精度との関係について考察する。簡単のため、u，u，vの計測誤差は統計的に同じ性質を有し、それらの標準偏差がσであるとする。誤差の伝播法則から、式(1)～(3)により求められるx，y，zの標準偏差σ，σ，σは、

【数1】

(3) 特開平4－264207

$$\sigma_x = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial u_l}\right)^2+\left(\frac{\partial x}{\partial u_r}\right)^2}\,\sigma$$

$$= \frac{y\sqrt{x^2+a^2}}{\sqrt{2}af}\sigma \qquad \cdots (4)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial u_l}\right)^2+\left(\frac{\partial y}{\partial u_r}\right)^2}\,\sigma$$

$$= \frac{y^2}{\sqrt{2}af}\sigma \qquad \cdots (5)$$

$$\sigma_z = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial u_l}\right)^2+\left(\frac{\partial z}{\partial u_r}\right)^2+\left(\frac{\partial z}{\partial v}\right)^2}\,\sigma$$

$$= \frac{y\sqrt{z^2+2a^2}}{\sqrt{2}af}\sigma \qquad \cdots (6)$$

のように表される。

【０００６】通常、カメラの標準的な全視野角は５０°程度以下であり、計測対象は主に地表面近くにあることから、ｙ≫ｘ＞ｚとなる。よって、視点と計測対象までの距離 $(x^2+y^2+z^2)^{1/2}$ はｙで近似できる。したがって、式(4)～(6)より、ｘ軸方向およびｚ軸方向すなわち左右および上下方向では誤差が距離に比例して大きくなるのに対し、ｙ軸方向すなわち奥行き方向では誤差が距離の２乗に比例して大きくなることがわかる。このためにステレオ画像計測では、視点から計測対象までの距離の増加とともに特に奥行き方向での計測誤差が著しく低下するという問題がある。

【０００７】このような問題を解決し精度の高い計測を行う方法として、従来、２種類のものがあった。第１の方法は、式(4)～(6)におけるσを小さくするすなわち画像面上の投影点の座標ｕ ，ｕ ，ｖを精度よく計測することによりσ ，σ ，σ を減少させる方法である。特にデジタル画像処理を行う場合には、画像をせいぜい縦横それぞれ数百個の画素に標本化するため空間分解能が低＊

＊く、画像面上の座標を決定するさいの誤差が大きい。そこで特願昭63-196007に示されるように、標本化されたデータを補間して画像面上の座標を精度よく求める方法が提案されている。データの補間を行うことによりある程度精度は向上するが、視点と計測対象との距離の増加とともにその増加をはるかに上回る誤差が生じてしまう。

【０００８】第２の方法は、相対的な位置関係が既知である複数の視点から計測した多数のデータを統合することにより精度を向上させる方法である。なお、前記第１の方法とこの第２の方法とは独立のものであるから、併用することにより両者の利点を活かすことができる。この第２の方法は、奥行き方法の誤差が視点から計測対象までの距離の２乗に比例することに注目し、各視点から得られた計測データに距離の２乗に逆比例する重みをつけ、重み付き平均を求めて真の座標を推定する方法である（浅田　稔,”センサ情報の統合と理解による移動ロボットのための世界モデルの構築”, 日本ロボット学会誌, ８巻, ２号, １６０～１７０頁）。

【０００９】この第２の方法について図５を用いて説明する。図５では簡単のため、２次元で表示し、記号￣を付加することにより各座標軸を表示してある。第１の視点を原点とする座標系（第１の視点座標系）を基準座標系とし、第ｉの視点を原点とする座標系（第ｉの視点座標系）においてＰ（ｘ ，ｙ ，ｚ ）で現される点の第１の視点座標系での表示を $P_i(x_i, y_i, z_i)$ とする。ここで $i=1, 2, \cdots, n$ であり、ｎは計測に用いた視点の総数である。さらに計測値と推定値とをそれぞれ

【外１】

$$\sim, \wedge$$

で区別する。この方法では、複数の視点から得られたデータに対し、各視点からの距離の２乗に逆比例した重みＷ を用いて、

【数２】

$$\hat{x} = \sum_{i=1}^{n} w_i \tilde{x}_i / \sum_{i=1}^{n} w_i \qquad \cdots (7)$$

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^{n} w_i \tilde{y}_i / \sum_{i=1}^{n} w_i \qquad \cdots (8)$$

$$\hat{z} = \sum_{i=1}^{n} w_i \tilde{z}_i / \sum_{i=1}^{n} w_i \qquad \cdots (9)$$

により計測対象の座標

【外２】

$$(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$$

を推定するようになっている。

【００１０】

【発明が解決しようとする課題】上述の複数の視点を用い距離の２乗に逆比例した重みを用いて重み付き平均を求める方法では、誤差の異方性を考慮していないため、計測対象の位置の正しい推定値が得られないという問題点がある。以下、その理由について図６を用いて説明する。図６では簡単のため２次元計測の場合を考える。

【００１１】基準座標系として第１の視点座標系を使用し、この座標系における物体の真の点を $P_1^0(x_1^0, y_1^0)$ とし○で表す。また、第１の視点 O_1 から点 P_1^0 を計測

(4)　特開平４－２６４２０７

したときの計測値、第２の視点O_2から点P_1^0を計測したときの計測値のそれぞれを

【外３】

$$\tilde{P}_1(\tilde{x}_1, \tilde{y}_1),\ \tilde{P}_2(\tilde{x}_2, \tilde{y}_2)$$

とし、それぞれ●で表す。また、￣を用いて各座標軸を

【外４】

$$\bar{x}_1$$

のように表す。図６において、各視点座標系のｙ方向に長軸を有する楕円１０が描かれているが、ステレオ計測における等誤差面は奥行き方向に長軸が概ね向いている楕円体となるので、この楕円１０は等誤差面を表している。計測されたｘｙ座標値に単純に距離の２乗に逆比例した重みを用いた場合には、２点

【外５】

$$\tilde{P}_1,\ \tilde{P}_2$$

を結ぶ直線上の内分点として△で表示されている推定点

【外６】

$$\hat{P}$$

を求める。しかしステレオ画像計測における誤差の性質を考えると、誤差が等方的ではないため、真の点P_1^0がこの直線上にあることは偶然であり、通常の場合は図６に示したようにこの直線上にはなく、正しい推定が行われないことになる。

【００１２】本発明の目的は、複数の視点からの計測結果に統計処理を施して物体の位置を計測する多視点ステレオ画像計測方法において、誤差の異方性を考慮した統計処理を施すことにより、計測精度を向上させた方法を提供することにある。

【００１３】

【課題を解決するための手段】本発明の多視点ステレオ画像計測方法は、ｎ（ただしｎ≧２）の視点を用い、第１の視点において前記物体を撮影し、撮影されたステレオ画像を演算処理して、前記第１の視点を基準点とする第１の視点座標系により前記物体の座標を計測する第１＊の工程と、前記第１の視点に既知量の並進操作および回転操作を施して得た第ｉ（ただし２≦ｉ≦ｎ）の視点のそれぞれにおいて前記物体を撮影し、撮影されたステレオ画像を処理して、前記第１の視点を基準点とする第ｉの視点座標系により前記物体の座標を計測する第２の工程と、前記各視点座標系間の相対位置関係に基づいて、前記第１の工程および第２の工程で行なわれた各計測の誤差の確率密度関数を合成し、前記物体の最尤推定位置を求める第３の工程とを有する。

【００１４】

【作用】複数の視点間の相対位置関係に基づいて、複数の視点からの計測の誤差の確率密度関数を求め、確率密度関数を合成して最尤推定位置を求めるので、誤差の異方性が結果に反映され、最も確からしい座標を求めることができる。以下、本発明の作用について詳述する。

【００１５】まず、本発明の作用を述べるに当たり、ステレオ画像計測における誤差の異方性の性質について説明する。ステレオ画像計測では、上述したように物体が投影された左右の画像面上の座標から上述の式(1)～(3)を用いて計測対象の物体の座標を求める。したがって、３次元空間における位置の決定精度は、画像面上の座標の計測精度に依存する。ここでは画像面上の座標の計測誤差が標準偏差σの正規分布にしたがうと仮定する。またこの計測には、垂直方向と水平方向との測定値の間の相互干渉、さらには左右の画像の測定値間の相互干渉がなく、それぞれの誤差が互いに影響を与えないとものとする。水平方向と垂直方向の測定の標準偏差σ，σが互いに異なる場合もありうるが、ここでは説明の簡単のためすべて同一とする。仮に標準偏差σ，σが異なるとしても結論に大異はない。

【００１６】この標準偏差σは、使用する測定系、すなわち光学系や画像面座標の決定アルゴリズムによって決定される固有の値である。画像面上の座標ｕ，ｕ，ｖの計測誤差が独立であって、それぞれが同じ正規分布をするという仮定から、計測誤差ｄｕ，ｄｕ，ｄｖが同時に起こる確率密度関数Ｓは、

【数３】

$$S = \frac{1}{(2\pi)^{3/2}\sigma^3} \exp\left\{ - \frac{\left(du_l^2 + du_r^2 + dv^2\right)}{2\sigma^2} \right\} \qquad \cdots (10)$$

で与えられる。標準偏差σが定数であることと指数関数が単調増加関数であることから、誤差評価関数Ｅを

$$E = du^2 + du^2 + dv^2 \qquad \cdots (11)$$

とおけば、最も確からしい座標は、Ｓを最大すなわちＥを最小にする座標として求められる。

【００１７】２次元の画像座標系で表されているＥを次※※のように３次元の空間座標系に変換する。式(1)～(3)をｕ，ｕ，ｖについて解くと、

$$u = f(x + a)/y \qquad \cdots (12)$$

$$u = f(x - a)/y \qquad \cdots (13)$$

$$v = fz/y \qquad \cdots (14)$$

が得られる。式(12)～(14)の全微分をとると、

【数４】

(5)　特開平4－264207

$$du_l = \frac{f}{y}dx - \frac{f(x+a)}{y^2}dy \quad \cdots (15)$$

$$du_r = \frac{f}{y}dx - \frac{f(x-a)}{y^2}dy \quad \cdots (16)$$

$$dv = -\frac{fz}{y^2}dy + \frac{f}{y}dz \quad \cdots (17)$$

となることから、式(15)～(17)を式(11)に代入すると、【数5】

$$E = 2\frac{f^2}{y^2}dx^2 + f^2\frac{2(x^2+a^2)+z^2}{y^4}dy^2 + \frac{f^2}{y^2}dz^2 - 4\frac{f^2x}{y^3}dxdy - 2\frac{f^2z}{y^3}dydz \quad \cdots (18)$$

が導かれる。式(18)はｄｘ，ｄｙ，ｄｚとＥの関係、すなわちｄｘ，ｄｙ，ｄｚと確率密度関数Ｓとの関係を表している。

【００１８】通常、実際のステレオ画像計測では、図３に示したｘｙ平面は水準器などを用いてmrad以下に水平を保って実施されるため、以下では視点間の相対位置関係として鉛直軸まわりの回転と水平面内での平行移動を＊考える。さらに、説明を簡単にするために平板測量などの２次元の計測を考え、ｖ軸については考慮しないものとする。しかし、以下の議論は３次元に容易に拡張できる。

【００１９】式(10)に対応する２次元計測の確率密度関数Ｓは、【数6】

$$S = \frac{1}{2\pi\sigma^2}\exp\left\{-\frac{du_l^2+du_r^2}{2\sigma^2}\right\} \quad \cdots (19)$$

であり、これより得られる誤差評価関数Ｅは【数7】

$$E = 2f^2\left(\frac{dx^2}{y^2} + \frac{x^2+a^2}{y^4}dy^2 - 2\frac{x}{y^3}dxdy\right) \quad \cdots (20)$$

となる。すなわち、式(10)，(11)において、ｄｖ＝０とし、$(2\pi)^{3/2}\sigma^3$を$2\pi\sigma^2$で置き換えたものにな※る。式(20)は適当な直交変換によって次の標準方程式(21)に変形できる。

$$E/2f^2 = \lambda_1\xi^2 + \lambda_2\eta^2 + \rho \quad \cdots (21)$$

ここで、λ_1，λ_2は、式(20)の特性方程式【数8】

$$\lambda^2 - \left(\frac{1}{y^2} + \frac{x^2+a^2}{y^4}\right)\lambda + \left\{\left(\frac{1}{y^2}\right)\left(\frac{x^2+a^2}{y^4}\right) - \left(\frac{x}{y^3}\right)^2\right\} = 0 \quad \cdots (22)$$

の２根である。式(22)の根と係数との関係から、２根の積$\lambda_1\lambda_2$および和$\lambda_1+\lambda_2$はそれぞれ

$$\lambda_1\lambda_2 = (y^2+x^2+a^2)/y^4 > 0 \quad \cdots (23)$$

$$\lambda_1+\lambda_2 = a^2/y^2 > 0 \quad \cdots (24)$$

となり、

$$\lambda_1 > 0、\lambda_2 > 0 \quad \cdots (25)$$

が導かれる。したがって式(19)で示された確率密度関数Ｓの等誤差面は楕円であることが明らかになった。

【００２０】次に、本発明の特徴である最尤推定座標の求め方について説明する。ｎ個の視点から同一物体をステレオ計測し、ｎ個の計測結果を統合することにより計★測精度の向上を図る。ここでは各視点間の相対的な位置関係、すなわち座標変換パラメータは既知であるとする。第i番目の視点における計測誤差を与える確率密度関数をS_i (i=1, 2, …, n) とすると、最尤推定座標は【数9】

$$S = \prod_{i=1}^{n} S_i \quad \cdots (26)$$

を最大とする座標として与えられる。すなわち、【数１０】

$$E = \sum_{i=1}^{n} E_i = \sum_{i=1}^{n}\left(du_{l,i}^2 + du_{r,i}^2\right) \quad \cdots (27)$$

を最小とする座標として求められる。ここで、$du_{l,i}$，$du_{r,i}$は第ｉ番目の視点における画像面上の投影座標

(6) 特開平4－264207

u . , u . に含まれる誤差を表す。後で証明するように、式(26)で表される各視点での誤差の確率密度関数、あるいは式(27)で表される誤差楕円を合成すると、合成後の等誤差面の形状が楕円となることから、この合成誤差楕円の中心座標が最大確率を与えることになる。以下、その求め方をを具体的に述べる。＊

＊【0021】図8に示すように、第1の視点における空間座標系（第1の視点座標系）をx y 座標で表し、第1の視点座標系を基準座標系とする。$x_1 y_1$座標系とx y 座標系との関係は既知であり、その関係を次のように表す。

$$x = x_1\cos\theta + y_1\sin\theta - t \quad \cdots(28)$$

$$y = -x_1\sin\theta + y_1\cos\theta - t \quad \cdots(29)$$

すなわちx y 座標系は、$x_1 y_1$座標系を、$x_1 y_1$平面に直交しO_1を通る軸のまわりにθだけ回転し、そののち回転後の座標軸に沿ってt , t だけ平行移動したものであるとする。

【0022】今、第1の視点座標系において座標$P^0(x^0, y^0)$にある物体を計測して得られた計測座標を※

※【外7】

$$\widetilde{P_i}(\widetilde{x_i}, \widetilde{y_i})$$

で表す。すなわち真の座標に添え字^{0}を、また計測された座標に記号~を用いて区別する。このとき、実空間内における計測誤差d x , d y は、

【数11】

$$dx_i = \widetilde{x_i} - x_i^0 \quad \cdots(30)$$

$$dy_i = \widetilde{y_i} - y_i^0 \quad \cdots(31)$$

で表される。式(15), (16)においてx, yを

【外8】

$$\widetilde{x_i}, \widetilde{y_i}$$

と、またdx, dyをd x , d y とみなすことにより、d u . , d u . が近似的に得られる。これらのd x , d y を計算するのに必要な第1の視点座標系における真の座標(x^0, y^0)を、式(28), (29)を用いて第1の視★

★点座標系での座標(x_1^0, y_1^0)で記述する。これらの結果を式(27)に代入することにより、合成確率密度関数の等誤差面の方程式は、x_1^0, y_1^0と各視点での計測座標

【外9】

$$\widetilde{x_i}, \widetilde{y_i}$$

を用いて、

【数12】

$$E=\sum_{i=1}^{n} c_{1i}(x_i^0)^2+\sum_{i=1}^{n} c_{2i}(y_i^0)^2+2\sum_{i=1}^{n} c_{3i}x_i^0 y_i^0+2\sum_{i=1}^{n} c_{4i}x_i^0+2\sum_{i=1}^{n} c_{5i}y_i^0+2\sum_{i=1}^{n} c_{6i} \quad \cdots(32)$$

と書ける。ここで係数c_1～c_6は、

【数13】

$$c_{1i}=\frac{\cos^2\theta_i}{\widetilde{y_i}^2}+2\frac{\widetilde{x_i}\cos\theta_i\sin\theta_i}{\widetilde{y_i}^3}+\frac{(\widetilde{x_i}^2+a^2)\sin^2\theta_i}{\widetilde{y_i}^4} \quad \cdots(33)$$

$$c_{2i}=\frac{\sin^2\theta_i}{\widetilde{y_i}^2}-2\frac{\widetilde{x_i}\cos\theta_i\sin\theta_i}{\widetilde{y_i}^3}+\frac{(\widetilde{x_i}^2+a^2)\cos^2\theta_i}{\widetilde{y_i}^4} \quad \cdots(34)$$

$$c_{3i}=\frac{\cos\theta_i\sin\theta_i}{\widetilde{y_i}^2}+2\frac{\widetilde{x_i}(\sin^2\theta_i-\cos^2\theta_i)}{\widetilde{y_i}^3}-\frac{(\widetilde{x_i}^2+a^2)\cos\theta_i\sin\theta_i}{\widetilde{y_i}^4} \quad \cdots(35)$$

$$c_{4i}=\frac{-t_{xi}\cos\theta_i}{\widetilde{y_i}^2}+\frac{(a^2-\widetilde{x_i}t_{xi})\sin\theta_i+\widetilde{x_i}t_{yi}\cos\theta_i}{\widetilde{y_i}^3}+\frac{(\widetilde{x_i}^2+a^2)t_{yi}\sin\theta_i}{\widetilde{y_i}^4} \quad \cdots(36)$$

$$c_{5i}=-\frac{t_{xi}\sin\theta_i}{\widetilde{y_i}^2}+\frac{(\widetilde{x_i}t_{xi}-a^2)\cos\theta_i+\widetilde{x_i}t_{yi}\sin\theta_i}{\widetilde{y_i}^3}-\frac{(x_i^2+a^2)t_{yi}\cos\theta_i}{\widetilde{y_i}^4} \quad \cdots(37)$$

$$c_{6i}=\frac{t_{xi}^2+a^2}{\widetilde{y_i}^2}-2\frac{(\widetilde{x_i}t_{xi}-a^2)t_{yi}}{\widetilde{y_i}^3}+\frac{(x_i^2+a^2)t_{yi}^2}{\widetilde{y_i}^4} \quad \cdots(38)$$

である。

【0023】次に、第1の視点における最尤推定座標を、式(32)の合成誤差評価関数すなわち合成楕円の中心

【外10】

$$\hat{P}_1(\hat{x}_1, \hat{y}_1)$$

として求める。式(32)について、

【外11】

(7) 特開平4－264207

$(\hat{x}_1, \hat{y}_1)$ ＊が原点になるような座標原点の平行移動

＊ 【数14】

$$x_1 = X_1 + \hat{x}_1 \quad \cdots (39)$$

$$y_1 = Y_1 + \hat{y}_1 \quad \cdots (40)$$

を考える。式(39), (40)を式(32)に代入すると、式(32)は

$$E = C_1 X_1^2 + C_2 Y_1^2 + 2 C_3 X_1 Y_1 + 2 C_4 X_1 + 2 C_5 Y_1 + C_6 \quad \cdots (41)$$

となる。ただし、C_1～C_6はそれぞれ

【数15】

$$C_1 = \sum_{i=1}^{n} c_{1i} \quad \cdots (42)$$

$$C_2 = \sum_{i=1}^{n} c_{2i} \quad \cdots (43)$$

$$C_3 = \sum_{i=1}^{n} c_{3i} \quad \cdots (44)$$

$$C_4 = \sum_{i=1}^{n} c_{1i}\hat{x}_1 + \sum_{i=1}^{n} c_{3i}\hat{y}_1 + \sum_{i=1}^{n} c_{4i} \quad \cdots (45)$$

$$C_5 = \sum_{i=1}^{n} c_{3i}\hat{x}_1 + \sum_{i=1}^{n} c_{2i}\hat{y}_1 + \sum_{i=1}^{n} c_{5i} \quad \cdots (46)$$

$$C_6 = \sum_{i=1}^{n} c_{1i}\hat{x}_1^{\,2} + \sum_{i=1}^{n} c_{2i}\hat{y}_1^{\,2} + 2\sum_{i=1}^{n} c_{3i}\hat{x}_1\hat{y}_1 + 2\sum_{i=1}^{n} c_{4i}\hat{x}_1 + \sum_{i=1}^{n} c_{5i}\hat{y}_1 + \sum_{i=1}^{n} c_{6i} \quad \cdots (47)$$

である。合成楕円の中心を原点としたことから、X_1とY_1の係数すなわち式(45), (46)で表されるC_4とC_5はそれぞれ0でなければならない。この条件から得られる連立方程式を解くことによって、最尤推定座標

【外12】

※ $(\hat{x}_1, \hat{y}_1)$

※ は、次のように求められる。

【数16】

$$\hat{x}_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n} c_{3i} \sum_{i=1}^{n} c_{5i} - \sum_{i=1}^{n} c_{2i} \sum_{i=1}^{n} c_{4i}}{\sum_{i=1}^{n} c_{1i} \sum_{i=1}^{n} c_{2i} - \left(\sum_{i=1}^{n} c_{3i}\right)^2} \quad \cdots (48)$$

$$\hat{y}_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n} c_{3i} \sum_{i=1}^{n} c_{4i} - \sum_{i=1}^{n} c_{1i} \sum_{i=1}^{n} c_{5i}}{\sum_{i=1}^{n} c_{1i} \sum_{i=1}^{n} c_{2i} - \left(\sum_{i=1}^{n} c_{3i}\right)^2} \quad \cdots (49)$$

【0024】次に、合成確率密度関数の等誤差面、すなわち誤差楕円を合成した結果が楕円になることを証明する。第1、第2の視点から計測して得られた計測結果の不確実性を示す誤差楕円をそれぞれ第1、第2の誤差楕円とする。これら誤差楕円は、適当な大きさの誤差に対応する等誤差面を構成する楕円である。図7に示すように、第1の誤差楕円11の中心を原点Q_1とし、この楕円の主軸と一致するように座標軸ξ_1軸, η_1軸をとり（第1の視点座標系）、これら各軸方向の半径をそれぞれ$r_{\xi 1}$, $r_{\eta 1}$とする。また第2の誤差楕円12についても同様にその中心を原点Q_2とし、主軸と一致するようにξ_2軸, η_2軸をとり（第2の視点座標系）、これら各軸方向の半径をそれぞれ$r_{\xi 1}$, $r_{\eta 1}$とする。ここでは、$r_{\eta 1}$, $r_{\eta 2}$をそれぞれ長軸とし、$r_{\xi 1}$, $r_{\xi 2}$を短軸とするように座標軸をとるものとする。

【0025】ところで、誤差評価関数Eとして、各視点における計測の等誤差面の方程式

【数17】

(8) 特開平4－264207

$$E_1=\frac{\xi_1^2}{r_{\xi1}^2}+\frac{\eta_1^2}{r_{\eta1}^2} \quad \cdots (50)$$

$$E_2=\frac{\xi_2^2}{r_{\xi2}^2}+\frac{\eta_2^2}{r_{\eta2}^2} \quad \cdots (51)$$

を考える。なお図７の誤差楕円１１、１２は式(50)、(51)で表される誤差評価関数E_1, E_2の値がそれぞれ１となる場合の等誤差面を示したものである。$\xi_1\eta_1$座標系＊

＊と$\xi_2\eta_2$座標系との関係は既知であり、その関係を次のように表す。

$$\xi_2 = \xi_1\cos\theta + \eta_1\sin\theta - t_\xi \quad \cdots (52)$$

$$\eta_2 = -\xi_1\sin\theta + \eta_1\cos\theta - t_\eta \quad \cdots (53)$$

すなわち$\xi_2\eta_2$座標系は、$\xi_1\eta_1$座標系を、$\xi_1\eta_1$平面に直交しQ_1を通る軸のまわりにθだけ回転し、そののち回転後の座標軸に沿ってt_ξ，t_ηだけ平行移動したものであるとする。

【００２６】第１の視点と第２の視点からの計測結果を※

※統合するために、それぞれの視点における誤差評価関数を合成する。式(20)に示すように合成誤差評価関数Eは２つの視点における誤差評価関数E_1, E_2の和として求められるので、式(50)～(53)より

$$\begin{aligned} E &= E_1 + E_2 \\ &= c_1\xi_1^2+c_2\eta_1^2+2c_3\xi_1\eta_1+2c_4\xi_1+2c_5\eta_1+c_6 \quad \cdots (54) \end{aligned}$$

となる。ただし、係数c_1～c_6は、

【数１８】

$$c_1=\frac{1}{r_{\xi1}^2}+\frac{\cos^2\theta}{r_{\xi2}^2}+\frac{\sin^2\theta}{r_{\eta2}^2} \quad \cdots (55)$$

$$c_2=\frac{1}{r_{\eta1}^2}+\frac{\sin^2\theta}{r_{\xi2}^2}+\frac{\cos^2\theta}{r_{\eta2}^2} \quad \cdots (56)$$

$$c_3=\left(\frac{1}{r_{\xi2}^2}-\frac{1}{r_{\eta2}^2}\right)\cos\theta\sin\theta \quad \cdots (57)$$

$$c_4=-\frac{t_\xi\cos\theta}{r_{\xi2}^2}+\frac{t_\eta\sin\theta}{r_{\eta2}^2} \quad \cdots (58)$$

$$c_6=-\frac{t_\xi\sin\theta}{r_{\xi2}^2}-\frac{t_\eta\cos\theta}{r_{\eta2}^2} \quad \cdots (59)$$

$$c_6=\frac{t_\xi^2}{r_{\xi2}^2}+\frac{t_\eta^2}{r_{\eta2}^2} \quad \cdots (60)$$

である。式(54)は適当な直交変換により標準方程式(61)に変換できる。

$$E = \lambda_1'\xi'^2+\lambda_2'\eta'^2+2c_4'\xi'+2c_5'\eta'+c_6 \quad \cdots (61)$$

ここで、λ_1', λ_2'は

$$\lambda^2-(c_1+c_2)\lambda+(c_1c_2-c_3^2)=0 \quad \cdots (62)$$

の２根である。式(62)の根と係数の関係から、２根の積★

★$\lambda_1'\lambda_2'$は、

【数１９】

$$\begin{aligned} \lambda_1'\lambda_2' &= c_1c_2-c_3^2 \\ &= \frac{1}{r_{\xi1}^2r_{\eta1}^2}+\frac{1}{r_{\xi2}^2r_{\eta2}^2}+\left(\frac{1}{r_{\xi1}^2r_{\eta2}^2}+\frac{1}{r_{\xi2}^2r_{\eta1}^2}\right)\cos^2\theta \\ &\quad +\left(\frac{1}{r_{\xi1}^2r_{\xi2}^2}+\frac{1}{r_{\eta1}^2r_{\eta2}^2}\right)\sin^2\theta \\ &> 0 \end{aligned} \quad \cdots (63)$$

となり、積$\lambda_1'\lambda_2'$の符号は常に正である。また２根の和$\lambda_1'+\lambda_2'$も、

【数２０】

(9) 特開平4−264207

$$\lambda_1'+\lambda_2'=c_1+c_2$$
$$=\frac{1}{r_{\xi1}{}^2}+\frac{1}{r_{\eta1}{}^2}+\frac{1}{r_{\xi2}{}^2}+\frac{1}{r_{\eta2}{}^2} \quad \cdots (64)$$

となり、その符号は正である。２根の積、和の両者とも正であることから、$\lambda_1'>0$、$\lambda_2'>0$すなわち２根とも正であることがわかる。

＊【００２７】ところで式(61)は、

【数２１】

$$E=\lambda_1'\left(\xi'+\frac{c_4'}{\lambda_1'}\right)^2+\lambda_2'\left(\eta'+\frac{c_5'}{\lambda_2'}\right)^2+c_6-\frac{c_4'^2}{\lambda_1'}-\frac{c_5'^2}{\lambda_2'} \quad \cdots (65)$$

と変形できる。式(65)は$\xi'=-c_4'/\lambda_1'$、$\eta'=-c_5'/\lambda_2'$で最小値E 、

$$E \quad =c_6-c_4'^2/\lambda_1'-c_5'^2/\lambda_2' \quad \cdots (66)$$

をとる。この最小値E より例えば１だけ大きい値E ＋１をとる点の軌跡を考えると、その軌跡の方程式※は

【数２２】

$$\lambda_1'\left(\xi'+\frac{c_4'}{\lambda_1'}\right)^2+\lambda_2'\left(\eta'+\frac{c_5'}{\lambda_2'}\right)^2=1 \quad \cdots (67)$$

で表される。$\lambda_1'>0$、$\lambda_2'>0$であることより式(67)は楕円を表す。以上の結果から、等誤差面の形状が楕円である計測結果を合成すると、合成誤差評価関数Eの表す等誤差面も楕円となることが明らかになった。

【００２８】次に、多視点画像計測の統合の原理による精度の向上の効果について検討する。

★【００２９】計測誤差を誤差楕円の面積で評価する。第１、第２の視点における誤差楕円および合成誤差楕円の面積をそれぞれA_1, A_2, A とすると、A_1, A_2, A はそれぞれ

【数２３】

$$A_1=\pi r_{\xi1}r_{\eta1} \quad \cdots (68)$$

$$A_2=\pi r_{\xi2}r_{\eta2} \quad \cdots (69)$$

$$A_c=\pi\left[\frac{1}{r_{\xi1}{}^2r_{\eta1}{}^2}+\frac{1}{r_{\xi2}{}^2r_{\eta2}{}^2}+\left(\frac{1}{r_{\xi1}{}^2r_{\eta2}{}^2}+\frac{1}{r_{\xi2}{}^2r_{\eta1}{}^2}\right)\cos^2\theta+\left(\frac{1}{r_{\xi1}{}^2r_{\xi2}{}^2}+\frac{1}{r_{\eta1}{}^2r_{\eta2}{}^2}\right)\sin^2\theta\right]^{-1/2} \quad \cdots (70)$$

で与えられる。式(102)〜(104)より明らかに

$$A_1>A\ ,\ A_2>A \quad \cdots (71)$$

であり、合成誤差楕円の面積は、もとの２つの誤差楕円の面積のいずれよりも小さい。

【００３０】ここで、もとの２つの誤差楕円の面積の幾☆何平均に対する合成誤差楕円の面積の縮小効率η_Aを

【数２４】

$$\eta_A=\frac{A_c}{\sqrt{A_1A_2}} \quad \cdots (72)$$

で定義する。式(68)〜(70)を式(72)に代入すると、

【数２５】

$$\eta_A=\left[\left(\frac{r_{\xi1}}{r_{\xi2}}+\frac{r_{\xi2}}{r_{\xi1}}\right)\left(\frac{r_{\eta1}}{r_{\eta2}}+\frac{r_{\eta2}}{r_{\eta1}}\right)+\left(\frac{r_{\eta1}}{r_{\xi1}}-\frac{r_{\xi1}}{r_{\eta1}}\right)\left(\frac{r_{\eta2}}{r_{\xi2}}-\frac{r_{\xi2}}{r_{\eta2}}\right)\sin^2\theta\right]^{-1/2} \quad \cdots (73)$$

が得られる。$r_{\xi1}, r_{\xi2}$を短軸、$r_{\eta1}, r_{\eta2}$を長軸としていることから、

◆【数２６】

$$\frac{r_{\eta1}}{r_{\xi1}}\leq1,\quad \frac{r_{\eta2}}{r_{\xi2}}\leq1 \quad \cdots (74)$$

であり、この結果

【数２７】

$$\left(\frac{r_{\eta1}}{r_{\xi1}}-\frac{r_{\xi1}}{r_{\eta1}}\right)\left(\frac{r_{\eta2}}{r_{\xi2}}-\frac{r_{\xi2}}{r_{\eta2}}\right)\geq0 \quad \cdots (75)$$

が導ける。したがって２つの誤差楕円の長径、短径の大小とは無関係に、$\theta=\pi/2$，$3\pi/2$のときすなわち第１、第２の誤差楕円の長軸が直交する場合に、合成誤差楕円の縮小効果が最大すなわち誤差分布が最小となる

(10) 特開平4－264207

ことがわかる。

【0031】次に、誤差の異方性すなわち誤差楕円の径の大きさの違い、および第1と第2の誤差楕円の長径のなす角度θの違いが合成誤差楕円に与える影響について調べる。第1、第2の誤差楕円の長径および短径はそれぞれ等しく$r_{\ell 1}=r_{\ell 2}$，$r_{s1}=r_{s2}$であるとし、長径と短径の比をk（$=r_{s1}/r_{\ell 1}=r_{s2}/r_{\ell 2}$）であるとする。kをそれぞれ1,2,4,8,16とし、θをそれぞれ0, $\pi/8$, $\pi/4$, $3\pi/8$, $\pi/2$としたときの合成誤差楕円の形状を求めた結果を図9に示す。さらに上記各kの値に対し、$0 \leqq \theta \leqq \pi/2$の範囲で$\theta$を連続的に変化させたときに式(73)より算出されるη_{λ}の値の変化の様子を図10に示す。図9、図10より、誤差の異方性が大きければ大きいほど、第1と第2の誤差楕円の長軸のなす角度θが0より少し大きいだけでも、合成誤差楕円の縮小効果が著しくなることがわかる。また、前述したように第1、第2の誤差楕円の長軸が直交する場合に縮小効果が最大となることから、異なる2視点から物体を計測する場合、その物体上において視線が直交するように前記2つの視点の位置関係を選べば、より精度よく計測が行なえることがわかる。

【0032】

【実施例】次に、本発明の多視点ステレオ画像計測方法の実施例について図面を参照して説明する。図1は本発明の一実施例の多視点ステレオ画像計測方法における視点と計測対象の物体の配置を説明する説明図、図2は図1を計測対象の物体付近で拡大した説明図である。なお、図2において、x_1軸とy_1軸の交点の座標は(-1,35)である。

【0033】計測は第1の工程から第3の工程までの3工程からなっている。図1に示すように、視点の数は2つであり、カメラ間隔(2a)を1mとし、各カメラには焦点距離すなわち投影中心と画像面との距離が16．1mmのレンズを装着して計測を行なった。以下、特に断らない限り、座標値はm単位で記述されているものとする。図1において○で示すように第1の視点と第2の視点を設定し、●で表される計測対象の物体の座標を計測した。第2の視点座標系O_2の原点を第1の基準座標系で記述すると(28.03,36.23)となり、第1の視点座標系から第2の視点座標系への回転角度は87．4°である。回転角度を90°に近くしたのは、上述したように、2つの誤差楕円の長軸が直交するときに精度の向上が最大になるためである。また、計測対象の物体の真の座標P^0は既知であって、第1の視点座標系によりその値を表すと(-2.30,36.76)である。

【0034】まず第1の工程として、第1の視点において計測対象の物体をカメラで撮影し、撮影されたステレオ画像を演算処理し、第1の視点座標系により表された計測対象の座標

【外13】

$$\tilde{P}_1$$

を求めた。その結果、(-2.49,36.02)が得られた。この第1の視点からの計測結果の座標を図1、図2において＋で表す。

【0035】次に第2の工程として、第2の視点において計測対象の物体をカメラ撮影し、撮影されたステレオ画像を演算処理し、第2の視点座標系により表された計測対象の座標

【外14】

$$\tilde{P}_2$$

を求めた。その結果、(-0.87,29.67)が得られた。この第2の視点座標系で表された座標値を第1の視点座標系における値

【外15】

$$^{1}\tilde{P}_2$$

に変換すると、(-1.65,36.69)となる。第2の視点からの計測結果を図1、図2において□で表す。

【0036】次に第3の工程として、計測対象の最尤推定位置を求めた。上述した手順に従い、第1、第2の各視点からの計測結果を上記式(33)～(38),(48),(49)に代入した。その結果、第1の視点座標系で表した最尤推定座標

【外16】

$$\hat{P}_1$$

は(-2.56,36.71)となり、真の位置からのずれは0．26mであった。この最尤推定座標を図2において△で表す。一方、従来の重み付き平均法で得られる推定座標は(-1.99,36.42)であり、その真の位置からのずれは0．45mである。この従来法による推定座標を図2において×で表す。以上の結果から、本実施例の測定結果は従来例に比べ約2倍の精度を有し、本発明の多視点ステレオ画像計測方法によって高精度の計測が行なえることがわかった。

【0037】

【発明の効果】以上説明したように本発明は、複数の視点間の相対位置関係に基づいて、複数の視点からの計測の誤差の確率密度関数を求め、確率密度関数を合成して最尤推定位置を求めることにより、誤差の異方性が結果に反映され、従来の方法に比べ、(1)計測精度を向上でき、(2)計測精度をよくするための視点の位置を決定することができる、という効果を有する。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の一実施例の多視点ステレオ画像計測方法における視点と計測対象の物体の配置を説明する説明図である。

【図2】図2は図1の計測対象の物体付近を拡大した説

(11)　　特開平4－264207

明図である。

【図3】ステレオ画像計測の原理を説明する図である。

【図4】ステレオ画像計測に用いられる装置の構成を示すブロック図である。

【図5】視点座標系間の関係を示す説明図である。

【図6】従来の多視点ステレオ画像計測方法の測定原理を説明する図である。

【図7】誤差楕円間の位置関係を説明する図である。

【図8】各視点座標系間の関係を示す説明図である。

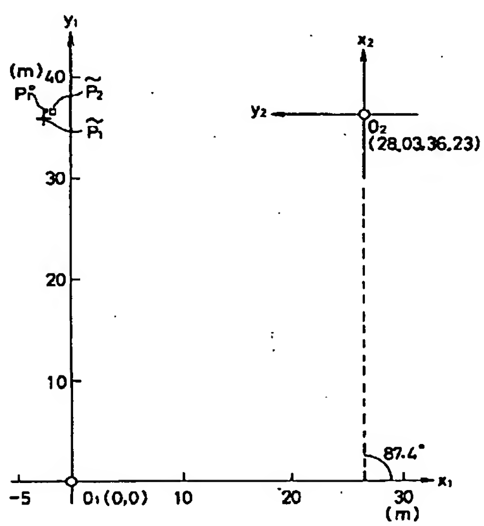
【図9】誤差の異方性と合成誤差楕円の形状との関係を示す図である。

【図10】誤差楕円の長軸間の角度と誤差楕円の縮小効率との関係を示した特性図である。

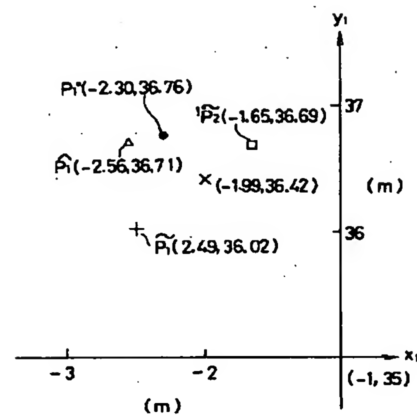
【符号の説明】

1　光軸
2　左カメラの画像面
3　右カメラの画像面
4　テレビカメラ
5　デジタイザ
6　画像メモリ
7　計算機
10　楕円
11　第1の誤差楕円
12　第2の誤差楕円

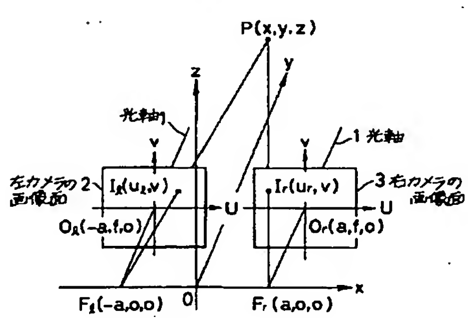
【図1】



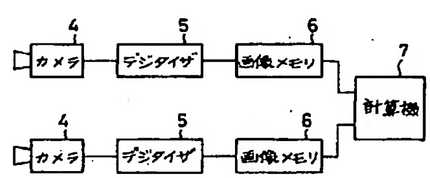
【図2】



【図3】

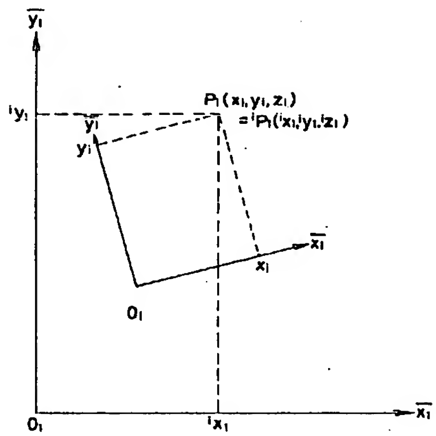


【図4】

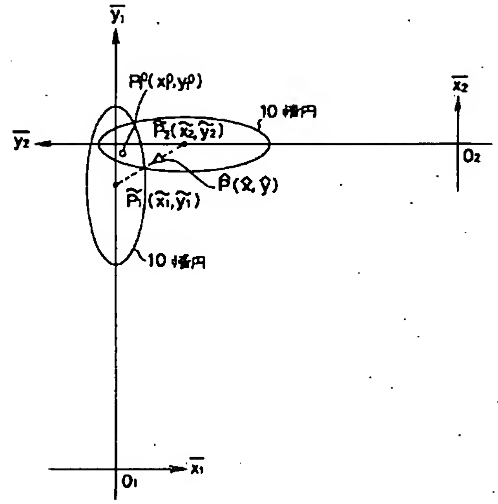


(12) 特開平4－264207

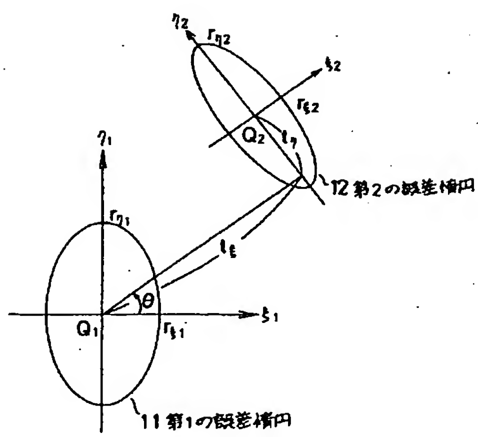
【図5】



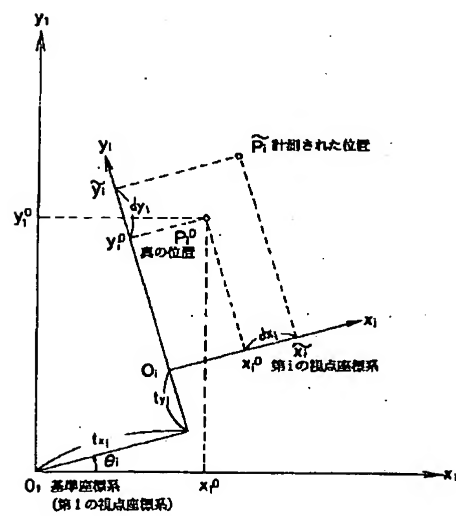
【図6】



【図7】

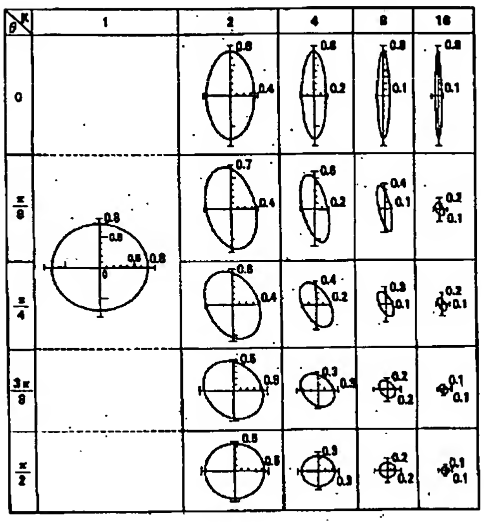


【図8】

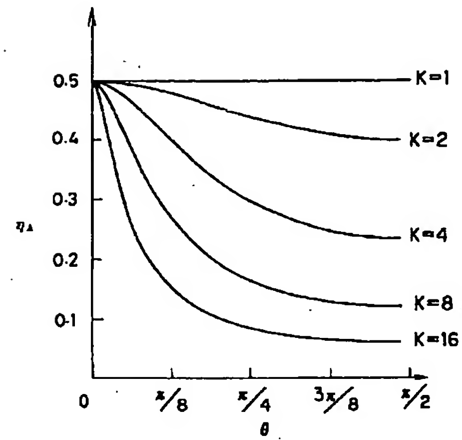


(13)　　特開平4－264207

【図9】



【図10】



フロントページの続き

(72)発明者　井手　敦志
東京都千代田区内幸町一丁目1番6号　日本電信電話株式会社内